

ОБОСНОВАНИЕ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГТД С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Гишваров А.С., Кондратьева Н.В., Минигалеев С.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

В данной работе рассматривается методика разработки ресурсных ускоренных испытаний с учетом связи между параметрами ускоренных испытаний и их конечной целью - экономическим эффектом от реализации изделия. Поскольку потребительские качества изделия закладываются при проектировании, отрабатываются на стадии доводки, обеспечиваются в серийном производстве и реализуются в эксплуатации, то очевидно, что наиболее эффективными ресурсные испытания будут в случае, когда выбор их параметров проводится с учетом основных этапов жизненного цикла изделия - проектирования, доводки, серийного производства, эксплуатации и ремонта.

С учетом дохода \tilde{D} , получаемого от реализации изделий, и затрат \tilde{Z} на обеспечение их потребительских качеств, рентабельность изделия оценивается по формуле:

$$\tilde{E} = \frac{\tilde{D} - \tilde{Z}}{\tilde{Z}}. \quad (1)$$

Показатель рентабельности от реализации изделия является критерием, подлежащим оптимизации при обосновании ресурсных испытаний, как отражающий конечную цель проведения ресурсных ускоренных испытаний (при этом, чем выше при прочих равных условиях эффективность испытаний, тем выше рентабельность).

Общая рентабельность \tilde{E} включает в себя долю рентабельности $E_{жци}$, обусловленную эффективностью ресурсных испытаний. При этом оптимизируются:

- объем испытываемых изделий N_y ;
- режимы и длительность испытаний $R_{yk}(\tau)$, $k = \overline{1, N_y}$;
- параметры системы отбора и подготовки изделий на проведение УИ ($\bar{C}_{оп}$);
- параметры системы контроля, приемки и отгрузки изделий ($\bar{C}_{кпо}$);
- параметры применяемого (стендового) оборудования (\bar{C}_o)

$$E_{жци} = f(N_y, R_{yk}(\tau), \bar{C}_{оп}, \bar{C}_{кпо}, \bar{C}_{оп}) = \max \quad (2)$$

Ввиду многообразия факторов, влияющих на рентабельность и имеющих случайный характер, доход D и затраты Z в (1) и (2) являются величинами случайными, поэтому оценка рентабельности $E_{уи}$ также является величиной случайной.

Все этапы ЖЦИ, за исключением этапа эксплуатации, требуют затрат, компенсируемых доходом от реализации изделия. Общие затраты $C_{жци}$ определяют стоимость ЖЦИ. С учетом (1):

$$\tilde{E}_{жци} = \frac{\tilde{D} - \tilde{C}_{жци}}{\tilde{C}_{жци}} = \frac{\tilde{D} - (\tilde{Z}_п + \tilde{Z}_д + \tilde{Z}_{пр} + \tilde{Z}_э + \tilde{Z}_р)}{(\tilde{Z}_п + \tilde{Z}_д + \tilde{Z}_{пр} + \tilde{Z}_э + \tilde{Z}_р)}, \quad (3)$$

где $\tilde{Z}_п, \tilde{Z}_д, \tilde{Z}_{пр}, \tilde{Z}_э, \tilde{Z}_р$ - затраты соответственно на этапах проектирования, доводки, производства, эксплуатации и ремонта изделия.

В общем случае, в момент времени τ часть величин, входящих в формулу (3), известна, по другим - возможна только прогнозная оценка. По мере увеличения времени τ от начала создания изделия уточняются как этапы жизненного цикла, так и затраты на них. Уточнение производится путем замены прогнозных оценок на фактические (для выполненных к моменту времени τ работ), уменьшения глубины прогноза, увеличения объема информации, используемой для прогнозных оценок и т.д.

Затраты, входящие в формулу (3) и связанные с параметрами УИ, определяются расчетом или оцениваются методом имитационного моделирования процессов доводки, производства, эксплуатации и ремонта изделия.

Затраты изготовителя на этапе эксплуатации изделия состоят из затрат на его техническое обслуживание и затрат, связанных с устранением отказов и неисправностей гарантийных изделий и т.д.

Однозначный выбор параметров УИ возможен только при детерминированном характере целевой функции (2), поэтому для практического применения ее необходимо преобразовать к виду:

$$\tilde{E}_{ри}^\gamma = \Phi(P_{ри}^*) \rightarrow \max; P_{ри}^* = [N_v^*, R_{ук}^*(\tau), \bar{C}_{оп}^*, \bar{C}_{кпо}^*, \bar{C}_o^*] \in G_P, \quad (4)$$

где $\tilde{E}_{ри}^\gamma$ - γ -процентная рентабельность, обусловленная влиянием параметров РИ; G_P - область реализации параметров УИ:

$$\text{Вер}\{\tilde{E}_{ри} \geq \tilde{E}_{ри}^\gamma\} = \gamma, \quad (5)$$

означающая, что с вероятностью γ рентабельность будет не меньше заданной величины.

Оценка целевой функции при выборе параметров ресурсных испытаний проводится на основе имитационного моделирования основных этапов жизненного цикла изделия. Поскольку информация, необходимая для разработки имитационной модели, как правило, является неполной, то неопределенные параметры и зависимости в каждой реализации испытаний выбираются по принципу наилучшего гарантированного результата:

$$E_{\text{PI}} = \max_P \min_X E^*(X, P_{\text{PI}}); \quad X \in G_X; \quad P_{\text{PI}} \in G_{\text{PI}}, \quad (6)$$

где X - вектор неопределенных параметров; G_X - область значений вектора X .

Применение имитационного моделирования (ИМ) при выборе параметров ресурсных испытаний позволяет учесть все основные факторы, влияющие на их эффективность.

Предложенный подход к обоснованию ресурсных испытаний позволяет обоснованно реализовывать одновременно несколько методов повышения эффективности испытаний:

- проведение ускоренных испытаний с форсированием режима нагружения;
- прогнозирование технического состояния изделия;
- целенаправленная подготовка изделия к испытаниям и др., а также проводить оптимизацию процессов доводки, производства и эксплуатации изделия.

Частным случаем реализации рассмотренного подхода к обоснованию ресурсных испытаний является оптимизация системы отбора изделий для проведения испытаний. Существующая практика проведения периодических испытаний, основанная на принципе случайного выбора изделия на испытания, не позволяет гарантировать надежность всей партии изделий, в зачет которой проводятся испытания. Уменьшить риск попадания в эксплуатацию некачественных изделий позволяют испытания, основанные на принципе атрибутивной (преднамеренной) выборки изделия по комплексу признаков (атрибутов), характеризующих его надежность, т.е. "худшего" по качеству в пределах технических условий.

Для серийно выпускаемых изделий ИМ включает в себя модели:

- производства;
- ресурсных (периодических, технологических) испытаний;
- эксплуатации изделия;
- ремонта изделия;
- обобщенную модель расходования ресурса изделия.

ИМ производства формируется с учетом рассеивания параметров, характеризующих качество применяемых материалов, уровень культуры производства (изготовления, сборки, испытания и т.д.).

Модель ресурсных испытаний формируется с учетом объема испытываемых изделий, параметров и длительности режимов нагружения.

ИМ эксплуатации учитывает тип летательного аппарата (ЛА), на который устанавливаются двигатели, время эксплуатации, зону базирования ЛА, влияние окружающей среды, особенности эксплуатации, обусловленные расписанием полетов и др.

Обобщенная модель расходования ресурса включает в себя зависимости повреждаемости основных элементов узлов двигателя от параметров нагружения, их длительности, качества изготовления и др.

ИМ жизненного цикла позволяет, с одной стороны, оценивать надежность изделия при заданной схеме эксплуатации и подбирать оптимальные параметры и длительность ресурсных испытаний (например, ускоренных), обеспечивающих в испытаниях повреждаемость элементов узлов, близкую к наиболее вероятной эксплуатационной повреждаемости.

С другой стороны, ИМ позволяет при заданном уровне надежности подбирать оптимальный вариант эксплуатации, обеспечивающий минимальные затраты на эксплуатацию, обслуживание и ремонт двигателя, тем самым обеспечивая максимальную рентабельность.

Рассматриваемый подход к обоснованию ускоренных испытаний апробировался на примере авиационного агрегата.

Требовалось обосновать программу ресурсных ускоренных (периодических) испытаний авиационного агрегата с целью:

- проверки надежности агрегата и подтверждение годности партии из N агрегатов к эксплуатации;
- проверки стабильности производства.

Надежность агрегата "лимитировалась" контактной прочностью подшипников ротора турбины и вала гидронасоса.

Формирование имитационной модели серийного производства, периодических испытаний и эксплуатации агрегата проводилось на основе априорной информации по рассматриваемым этапам ЖЦИ, данных о нагруженности элементов узлов, определенных кратковременными испытаниями препарированного для этих целей агрегата.

Априорная информация включала:

- модель повреждаемости радиально-упорного подшипника с учетом осевой нагрузки A , частоты вращения вала n , температуры смазки T_{CM} , начального радиального зазора δ_0 и посадки подшипника на вал γ :
$$P=f(A, n, T_{CM}, \delta_0, \gamma);$$
- статистические данные по посадочным диаметрам валов и внутренних колец подшипников, а также данные по начальным радиальным зазорам :

$$D_B \in G_D; D_{II} \in G_{II}; \delta_0 \in G_{\delta};$$

- эксплуатационный цикл нагружения агрегата, задаваемый изменением по времени подачи агрегата Q_H , температуры воздуха на входе в турбины T_{BX}^* , объема смазки редуктора V_{CM} :

$$\bar{R}(\tau) = [Q_H(\tau), T_{BX}^*(\tau), V_{CM}(\tau)];$$

- стоимость агрегата, себестоимость часа его работы на стенде и затраты от потери работоспособности агрегата в эксплуатации.

Данные по тепловой и механической нагруженности элементов агрегата определялись экспериментально для различных режимов нагружения.

Логическая схема испытаний была следующей:

- при отказе любого из N_y испытываемых агрегатов партия браковалась и доработке не подлежала;
- отказавший в эксплуатации агрегат снимался и дальнейшему восстановлению не подлежал (при этом эксплуатация других агрегатов из этой партии продолжалась и никаких мероприятий по устранению дефектов не проводилось).

Оптимизировались следующие параметрами испытаний:

- количество испытываемых агрегатов N_y ;
- номинальная подача насоса Q_H ;
- температура воздуха на входе в турбину T_{BX}^* ;
- объем смазки редуктора привода насоса V_{CM} ;
- длительность испытаний $\tau_{ук}$;

Результаты выбора оптимальных значений параметров испытаний из условия

$$C \sim \bar{E}_{yn}^\gamma = \Phi[N_y, Q_H(\tau), T_{BX}^*(\tau), V_{CM}(\tau)] \rightarrow \max;$$

$$(Q_H, T_{BX}^*, V_{CM}) \in G_R; \quad (7)$$

$$(\bar{C}_{оп}, \bar{C}_{кло}, \bar{C}_o) = idem;$$

$$\gamma = 50\%,$$

где C - себестоимость часа работы агрегата в эксплуатации), показали, что применение моделирования этапов жизненного цикла агрегата для выбора параметров ресурсных испытаний позволило уменьшить себестоимость часа его работы в эксплуатации, по сравнению с вариантом типовых ресурсных испытаний, в 1,6 раза и сократить длительность испытаний в 1,4 раза, что, в конечном итоге, повышает эффективность системы управления качеством выпускаемых агрегатов.

В целом данный подход к выбору параметров ресурсных испытаний позволяет как реализовывать одновременно несколько методов повышения эффективности испытаний (например, проведение испытаний с форсированием режимов, прогнозирование технического состояния изделия по наработке, организация испытаний по принципу атрибутивной выборки и др.), так и проводить оптимизацию процессов доводки, производства и эксплуатации технических изделий.